

SX-9 FORTRAN90/SXの自動並列化機能

著者	横谷 雄司
雑誌名	SENAC : 東北大学大型計算機センター広報
巻	41
号	3
ページ	25-42
発行年	2008-07
URL	http://hdl.handle.net/10097/00124448

[新スーパーコンピュータ SX-9]

SX-9 FORTRAN90/SX の自動並列化機能

横谷 雄司

日本電気株式会社 第一コンピュータソフトウェア事業部

概 要

FORTRAN90/SX は、SX-9 のもつ並列処理機能を利用して、その性能を十分に引き出すための高度な自動並列化機能を備えている。本文では、並列処理の概念、自動並列化機能、および並列化促進のための技法について紹介する。

1. はじめに

SX-9 は、ベクトル処理に並列処理機能を融合した「スケーラブル・パラレル・スーパーコンピュータ」です。このハードウェアのもつ高い能力を発揮させるためには、コンパイラのベクトル化/並列化機能が重要な役割を果たします。

FORTRAN90/SX は、SX のハードウェアに密着した高度な最適化、ベクトル化、並列化機能を有した Fortran95 コンパイラです。SX-9 は、1 ノード内 16 台のプロセッサの範囲内では、利用しやすい共有メモリ方式を採用しており、FORTRAN90/SX は、この共有メモリ方式を使った自動並列化機能を提供しています。

一般に、並列化を行う時には、並列実行しても結果が変わらないことを保証するために、データの依存関係の解析を行い、細心の注意を払ってプログラムの変形や指示行の挿入をしなければなりません。自動並列処理機能を利用すると、それらの作業を自動的にコンパイラが行います。また、ベクトル化と同様に、効果的に並列化を行うためのオプションや指示行が用意されており、十分にプログラムのチューニングを行うことが可能です。本稿では、並列処理の概念と、自動並列化機能および関連する指示行についてご紹介します。

2. 並列処理とは

並列処理とは、1 つの仕事をいくつかの小さな仕事(タスク)に分割し、それを複数の CPU で並列に実行することです。FORTRAN90/SX コンパイラが備えている自動並列処理機能とは、「コンパイラがプログラムを解析して、並列に実行可能なループや文の集まりを抽出し、ループの繰り返しや文の集まりを複数のタスクに自動的に割り当てて実行時間を短縮する機能」です。

コンパイラが、do ループを 4 つのタスクに分割して実行するイメージは、次の図のようになります。この例では、外側ループの 100 回の繰り返しを 4 つに分割して、各 CPU 上で各々を並列に実行します。

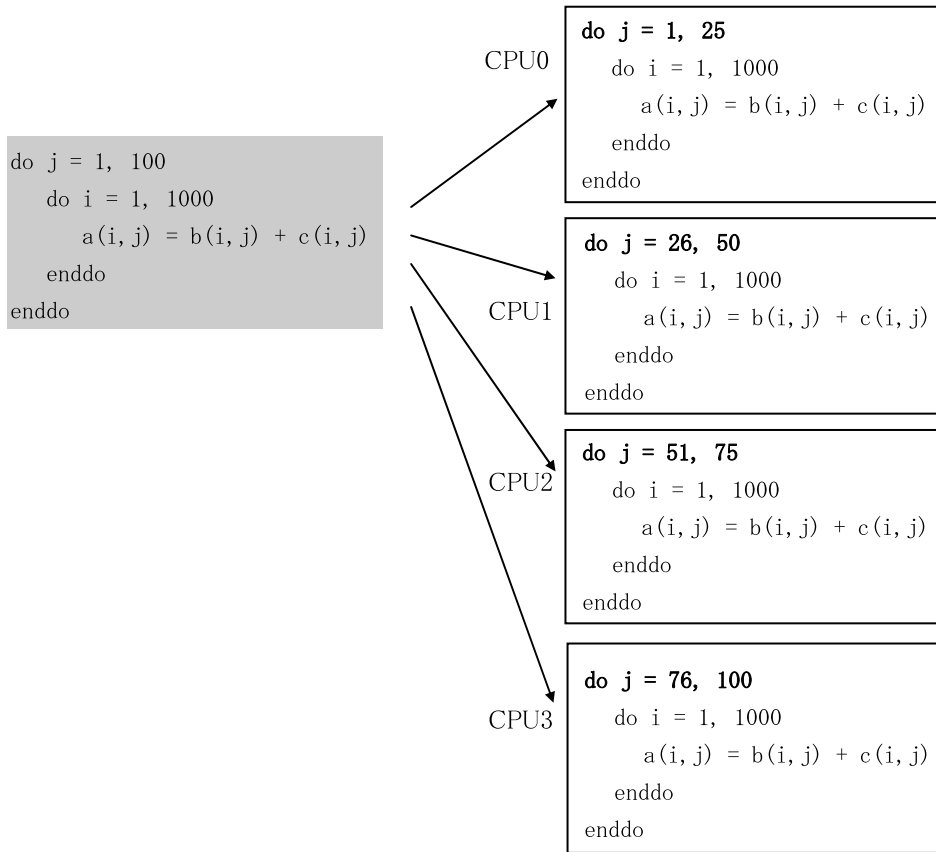


図 1 並列実行のイメージ

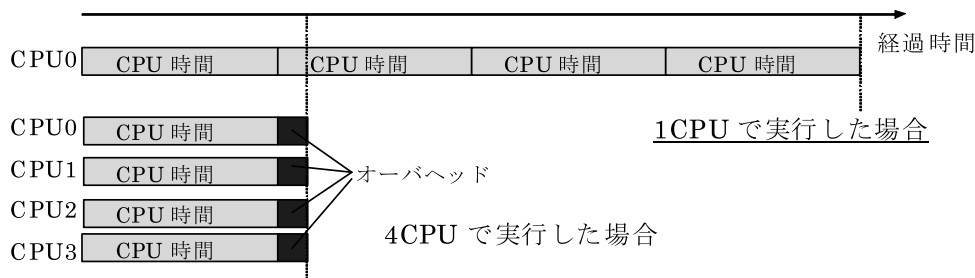
この例の配列 a は分割されて、各タスク毎に値 ($a(i,1) \sim a(i,25)$, $a(i,26) \sim a(i,50)$, $a(i,51) \sim a(i,75)$, $a(i,76) \sim a(i,100)$) が計算され、定義されるので、 a は各タスクから共通に参照できるグローバルな領域に割り当てられます。このような各タスクから共通に参照できるデータをタスク間共有データと呼びます。これに対して、並列実行される各タスクから、非同期に定義/参照を行うと、結果が不正になってしまうようなデータ(上例では i)は、各タスク毎にローカルな領域(スタック)に割り当てられ、タスク固有なデータと呼びます。自動並列化機能は、このようなデータの割り当ても適切に行います。

この自動並列化機能は、オプション“-P auto”を指定するだけで利用可能です。

```
sxf90 -P auto program.f
```

ここで、“実行時間の短縮”には注意が必要です。並列処理は、1 つの仕事を分割して、並列に実行を行うわけですから、CPU 時間が削減されるわけではなく、経過時間が短縮されることになります。また、仕事を各タスクで並列実行させるための処理(オーバーヘッド)も必要となり、CPU 時間は、かえって増加することになります。たとえば、CPU 時間と経過時間の関係は、以下のようになります。

図 2 並列処理における CPU 時間と経過時間



2.1 並列処理とベクトル処理

ここで、“ベクトル化による実行時間の短縮”と“並列化による実行時間の短縮”との相違を明確にしたいと思います。ベクトル処理とは、規則的に並んだ複数の配列データを一度に演算する高速なベクトル命令を使って処理を行うことであり、この場合、CPU 時間が短縮され、同時に経過時間も短縮されます。これに対して、並列処理では、先に述べた通り、合計の CPU 時間は並列化のオーバーヘッドにより、単一 CPU で実行した時よりも増加することになりますが、経過時間を短縮することによって高速化を図ります。したがって、ベクトル化の場合は、単一 CPU での実行ですが、上手にベクトル化できれば、スカラで実行した時よりも、一般的に 10 倍以上の性能向上が期待できます。並列化の場合に期待できる性能向上の効果は、最大で使用可能な CPU の個数倍となります。

これらのことより、基本的には、ベクトル化と並列化を組み合わせ利用し、多重ループの内側ループについてはベクトル化を行い、外側ループを並列化することが、高速化を図る最善の方法となります。

また、並列処理した場合には、オーバーヘッド時間が加わりますので、並列に実行される仕事量(粒度と呼びます)が十分に大きくなければ、並列化の効果は期待できません。当然ですが、並列処理のオーバーヘッド時間よりも並列実行される部分の実行時間の方が小さければ、並列化したことにより、実行時間(経過時間)がかえって多くなってしまうことになります。

ベクトル化できるプログラムは、ベクトル化すればほとんど全ての場合に性能向上が図れますが、並列化できるプログラムは、並列化したからといって必ずしも性能が向上するとは限らないことになります。すなわち、どんなプログラムでも自動並列化すれば性能が向上するということではないことに注意して下さい。

以下では効果的な並列化の方法について説明をしていきたいと思います。

3. 自動並列化

自動並列化機能を使用すれば、その名の通り、並列用の指示行を直接使って並列プログラミングをする場合に比べ、格段に容易にプログラムを並列化することができます。自動並列化機能は、プログラムを解析し、並列化した場合の効果も調べて、並列化を行います。たとえば、並列化すれば十分性能が向上するだけの粒度をもっているか、do ループの繰り返しを並列実行しても結果不正になるような文を含んではいないかなどを調査し、可能な場合は、並列化できるようにループやデータの定義を書き直します。

自動並列化は、内部的に図 3 のようなイメージで行われます。

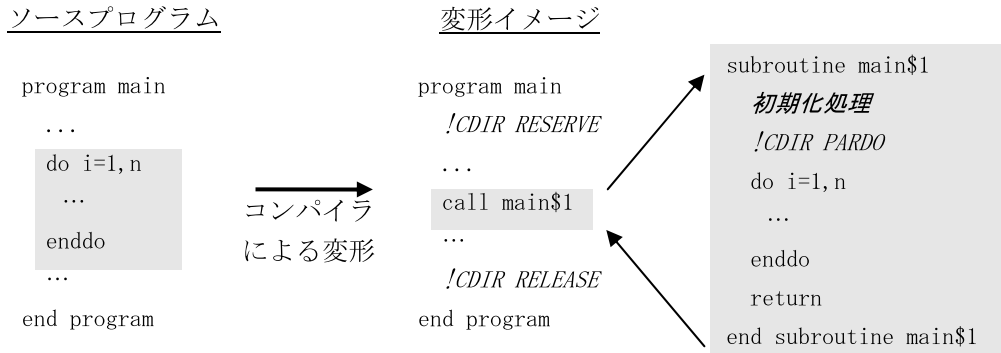


図 3 自動並列化におけるコンパイラの変形イメージ

コンパイラは並列可能なループを検索し、そのループを新たにサブルーチンとして切り出して並列化します。並列実行されるループをサブルーチンとして切り出すことによって、並列化効率を最大限に引き出すことが可能となります。上記例の!CDIRで始まる行はコンパイラによって挿入された並列制御のためのもので、RESERVE はタスクの確保、RELEASE はタスクの解放、PARD0 はループを並列実行することを指示します。また切り出されたサブルーチン名には、元のサブルーチン名に\$1, \$2, ...とサフィックスが付きます。コンパイル時に、オプション-R1 を指定することによって、並列化された様子を示すリスト(変形リスト)を参照することができます。

3.1 自動並列化の条件

自動並列化の条件は、以下の通りです。

表 1 FORTRAN90/SX 自動並列化対象

対象となる構文	DO ループ 配列式
対象となるデータの型	構造型, 文字型以外の型(4 倍精度も可能)
対象となるループ中に 許される文	代入文, IF 文, GOTO 文, CONTINUE 文, CALL 文, SELECT 構文
対象となる演算	加減乗除算, べき算, 論理演算, 関係演算, 型変換, 組込み関数

- ループ中のデータに依存関係がある場合に、ベクトル化や並列化ができなくなること

がありますが、その条件には違いがあります。次の例では、ベクトル化は可能ですが、並列化はできません。配列 a の要素がループのある繰り返し回で定義され、別の繰り返し回で参照される(たとえば $a(2)$ は $i=2$ の繰り返し回で参照され、 $i=3$ の繰り返し回で定義される)ため、ループの繰り返しを並列実行すると、結果不正になる可能性があります。

```
do i = 2, n
  a(i-1) = a(i) * b(i) + c(i)
enddo
```

並列化の場合は、ループの繰り返し間でデータの依存関係があると、並列化できなくなるため、ベクトル化よりも条件が厳しくなります。

- CALL がループ中にある場合、ベクトル化はできませんが、呼び出すサブルーチンが並列実行可能であれば、そのループを並列化することができます。
- ベクトル化では、4 倍精度用のベクトル命令がないため、4 倍精度のベクトル化は不可能でしたが、並列化においては、ハード的な制約はないため、並列化が可能です。

3.2 自動並列化方法

並列実行される場合は、先にも述べた通り、粒度が十分に大きくなければその効果が期待できません。また、SX-9 はベクトルマシンであるため、別稿でご説明したように、ベクトル化が性能向上には欠かせません。ベクトル化は CPU の処理時間を短縮、すなわち粒度を小さくします。したがって、ベクトル化を行っても並列の粒度をなるべく大きく保てるように考慮する必要があります。自動並列化機能は、基本的には、多重ループの内側ループをベクトル化し、外側ループを並列化します。内側ループがベクトル化できない場合は、スカラーコードのまま外側ループが並列化されます。

```
subroutine sub(a, h)
  real a(600, 100, 100)
  integer h(100)
  do i = 1, 100
    並列化
    do j = 1, 100
      do k = 1, 599
        a(k, j, i) = (a(k+1, j, i) + a(k, j, i)) * 0.5
      enddo
      ベクトル化
    enddo
    h(i) = h(i) + 1
  enddo
end
```

さらに、コンパイラは、並列化の効果を高めるため、可能であればループ変形などの最適化を行い、並列化を促進します。これらの並列化の工夫について、いくつか例を紹介します。

◆ 一重ループの場合

基本的には、ベクトル化を行います。ループのコストが大きい、つまり粒度が大きい場合は、ループを分割して、ベクトル化＋並列化を行います。ベクトル化できない場合は、並列化だけが行われます。

```
do i= 1,100
  a(i) = sqrt(b(i)**2 + c(i)**2)  ベクトル化
enddo
```

```
do i = 1,10000
  a(i) = sqrt(b(i)**2 + c(i)**2)  ベクトル化＋並列化
enddo
```

◆ ループ融合や一重化が可能なループの場合

ループ融合や一重化などのループの最適化を行った後に、並列化を行います。

```
subroutine sub(a, b, c)
real a(10000, 4), b(10000, 4), c(10000, 4)
do j= 1, 4
  do i=1, 10000
    a(i, j) = sqrt(b(i, j))
  enddo
enddo
do j= 1, 4
  do i=1, 10000
    b(i, j) = c(i, j) - a(i, j)
  enddo
enddo
return
end
```

→
ループ融合
＋
一重化

```
do j=1, 10000*4
  a(j, 1) = sqrt(b(j, 1))
  b(j, 1) = c(j, 1) - a(j, 1)
enddo  並列化
```

◆ 条件並列化

ループ長(粒度)あるいは依存関係が不明で、並列化の効果がコンパイル時に判断できない場合、実行時に粒度や依存関係を調べて並列コードを実行するかどうかを選択できるように条件並列化を行います。

次の例では、 $nx*ny > n$ によって、粒度が並列化するのに十分かどうかを調べていま

す. これは, ループの繰り返し数が十分に大きいかどうかを実行時にチェックしているわけですが, このとき, コンパイラは単純に繰り返し数だけではなく, do ループ中の各演算 (加算や乗算など) に対して重み付けを行い, do ループの演算コストから並列化の効果が十分に期待できる値 (n) を計算して, 条件並列化を行います.

また, ループ中のデータに繰り返しにまたがった依存関係がある場合は並列化すると正しい結果が得られませんが, この例では, 配列 y を定義している y(ic+i) と y(id+i) の添字に現れる変数 ic と id において

id=ic または id と ic の値の差が nx 以上

という条件が満たされていれば, ループの実行中に y(ic+i) と y(id+i) により値が変更される領域に重なりがないことが保証できます.

この条件 (id-ic=0 .or. abs(id-ic)>=nx) を実行時に調べ, 並列実行可能な場合のみ並列コードを実行するようにしています.

```
do i = 1, nx
  aa = a
  bb = b
  do j = 1, ny
    aa = aa + x(i+1) * g(j-1)
    bb = bb + x(i-1) * g(j-1)
  enddo
  y(ic+i) = -aa
  y(id+i) = -bb
enddo
```

if (nx*ny > n .and.
(id-ic = 0 .or. abs(id-ic) >= nx) then
並列コード
else
非並列コード
endif

条件並列化

◆ 手続き呼び出しを含むループの場合

ループ内に手続き呼び出しがある場合、その手続き呼び出しにより、ループの繰り返しのたびにまたがるデータの依存関係が生じていなければ、後で説明する CNCALL 並列化指示行を指定するか、手続きをインライン展開することによって並列化を行うことができます。以下に示す例の2つのサブルーチン abc, def中のループは、展開イメージからわかるように、データに依存関係が存在しないため、並列化が可能です。

<pre> real x(100, 100), y(100, 100), z(100, 100) do i = 1, 100 call abc(x(1, i), y(1, i), 100) call def(y(1, i), z(1, i), 100) enddo end subroutine abc(a, b, n) real a(n), b(n) do i = 1, n b(i) = a(i) + 1.0 / a(i) enddo end subroutine def(a, b, n) real a(n), b(n) do i = 1, n b(i) = b(i) + sqrt(a(i)) enddo end </pre>	<p>→</p> <p>インライン展開</p>	<pre> do i = 1, 100 !サブルーチン abc を呼び出したイメージ do i1 = 1, 100 y(i1, i) = x(i1, i) + 1.0 / x(i1, i) enddo !サブルーチン def を呼び出したイメージ do i2 = 1, 100 z(i2, i) = z(i2, i) + sqrt(y(i2, i)) enddo enddo </pre>
	<p>↓</p> <p>並列化イメージ</p>	<pre> do i = 1, 100 do i1 = 1, 100 y(i1, i) = x(i1, i) + 1.0 / x(i1, i) enddo do i2 = 1, 100 z(i2, i) = z(i2, i) + sqrt(y(i2, i)) enddo enddo end </pre> <p style="text-align: right;"><u>並列化</u></p>

◆ 配列構文の場合

配列構文の場合は、内部的には、do ループのイメージに展開され、その後で、ベクトル化、並列化が行われます。

<pre> real a(2000, 1000), b(2000, 1000), c(2000, 1000) a(1:1000, :) = b(1:1000, :) * c(1:1000, :) b(1:1000, :) = sin(c(1:1000, :)) </pre>	<p>→</p> <p>並列化 イメージ</p>	<pre> do j = 1, 1000 do i = 1, 1000 a(i, j) = b(i, j) * c(i, j) b(i, j) = sin(c(i, j)) enddo enddo </pre> <p style="text-align: right;"><u>並列化</u> <u>ベクトル化</u></p>
---	-------------------------------------	---

4. 並列化の阻害要因と並列化指示行

4.1 並列化の阻害要因

先にも述べた通り、ループの繰り返し間にデータの依存関係がある場合は、並列化はできません。並列化を妨げる要因をいくつか紹介します。

◆ 添字に重なりがある場合

```
do i = 1, n
  a(i) = b(i+1)
  b(i) = c(i)
enddo
```

この例も 3 節で述べた例と同様に、ループの繰り返し間にデータの依存関係があるために並列化ができない例です。ただし、ベクトル化は可能です。依存関係によるベクトル化可/並列化不可の理由をもう少し具体的に説明します。

ベクトル化の場合は、ループの繰り返しの実行順序は保証されますが、並列化の場合は、ループの実行順序は保証されません。上記例においてループの繰り返しと配列 b の定義/参照関係に着目すると以下ようになります。この例では、ベクトル化の場合は、参照と定義の順番は保証され、たとえば、 $b(3)$ の値は必ず参照してから定義されることになります。

ループの繰り返し	参照	定義
1	$b(2)$	$b(1)$
2	$b(3)$	$b(2)$
3	$b(4)$	$b(3)$
...

すなわち、ループの繰り返しにまたがった定義/参照関係は、プログラム通りの正しい関係が保持されることになります。次に並列化の場合ですが、簡単のために、ループの繰り返し 2 回毎に並列化する場合を例に考えてみます。

ループの繰り返し	参照	定義	
1	$b(2)$	$b(1)$	タスク 1 で実行
2	$b(3)$	$b(2)$	
3	$b(4)$	$b(3)$	タスク 2 で実行
4	$b(5)$	$b(4)$	
...

この場合は、タスク 1、タスク 2、... が並列に実行されることになるため、 $b(3)$ の値がタスク 1 で参照されるタイミングとタスク 2 で定義されるタイミングの順序は保証できません。すなわち、先にタスク 2 で定義された値 ($c(3)$ の値) をタスク 1 で参照して、 $a(2)$ に代入してしまう可能性があるわけです。

◆ 定義と引用が閉じていない場合

```
do i = 1, n
  c(i) = t
  t = b(i)
enddo
```

ループ中で、変数 t を引用してから、定義しているため、ループの繰り返しを並列実行すると、結果不正となります。文の意味は変わってしまいますが、次のように変数 t を定義してから、引用していれば、並列化が可能です。

```
do i = 1, n
  t = c(i)
  ...
  b(i) = t
enddo
```

◆ IF 文下に DO 変数以外のインデックス変数がある場合

```
do j = 1, n
  do i = 1, n
    if (a(i, j) >= del) then
      ii = ii + 1
      ic(ii, j) = ii
    endif
  enddo
  do i = 1, ii
    b(i, j) = ic(i, j) + sin(c(ii, j))
  enddo
enddo
```

ii の更新 (IF 文 THEN 節の実行) が $a(i, j)$ の値に左右され、 ii は外側ループの繰り返しにおいても加算されていきますが、外側ループで並列化された場合、各タスクで並列実行されるループ毎に ii が加算されてしまい、 ii の値が正しく計算されなくなり、 b の結果が不正となります。

◆ ループからの飛び出しがある場合

```

do j = 1, n
  do i = 1, n
    a(i, j) = sqrt(b(i, j))
    if (a(i, j) >= del) go to 100
    if (c(i, j) >= 0) then
      b(i, j) = c(i, j) - a(i, j)
    else
      b(i, j) = c(i, j) + a(i, j)
    endif
  enddo
enddo
100 continue

```

並列実行されると、ループの繰り返しの実行順序が保証されないため、ループから飛び出すタイミングがプログラム通りにならない場合があります、本来値が変更されないはずの配列 b の要素の値が書き換えられてしまう可能性があります。

4.2 指示行の利用とソースプログラムの書き換えによる並列化促進

並列化の阻害要因は、上記以外にもありますが、比較的発生し易い状況は、依存関係によって並列化が妨げられる場合や、各タスクで同じデータに書き込みを行ってしまうことによって結果不正を引き起こしてしまうような場合です。これらは、プログラミング上の工夫によって、回避することが可能な場合も多々あります。また、ベクトル化の場合と同じように、プログラマには、依存関係がないことがわかっており、それをコンパイラに教えてやることによって並列化が可能になる場合もあります。このような状況に対応できるように、FORTRAN90/SX コンパイラには、指示行が用意されています。本節では、指示行の紹介と利用法、およびプログラミング上の工夫の例を紹介します。

(1) 並列化指示行

並列化指示行は、カラム 1 から

!CDIR オプション

の形式で指定します。並列化用の主な指示行のオプションとその利用法は、次の通りです。

◆ CONCUR / NOCONCUR

直後のループを自動並列化の対象とする/しないを指定します。

たとえば、並列化するとかえって性能が劣化するループをプログラムが含んでいる場合に、そのループの先頭に NOCONCUR を指定します。

◆ INNER / NOINNER

最内側ループあるいは一重ループを自動並列化の対象とする/しないを指定します。

最内側ループは、既定値では自動並列化の対象とはならないため、最内側ループを並列化できると効果がある場合に、INNER を指定します。また、一重ループの場合も、並列化効果がコンパイル時に不明な場合は、並列化の対象とはなりません。が、INNER を指定することによって並列化をすることが可能となります。

!CDIR INNER

do i = 1, n

a(i) = a(i)+b(i)*c(i)

enddo

イメージ

```
if (n > 1000) then
  ベクトル+並列コード
else
  ベクトルコード
endif
```

この例では、コンパイラは、ループ中のコストを計算して、条件並列化を行っています。

◆ NOSYNC

ループ中の配列要素に重なりがないことを指定します。

次の例で、k1 と k2 の値がコンパイル時に不明な場合は、k1=k2 であった場合に結果不正になる可能性があるため、このループを自動並列化することはできません。k1 と k2 の値が同じでないことがわかっている場合は、NOSYNC を指定することによって並列化が可能となります。

!CDIR NOSYNC

do j = 1, ny

do i = 1, nx

a(i, k1, j+1) = a(i, k2, j) + b(i)

enddo

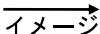
enddo

並列化

◆ SELECT(CONCUR)

多重ループにおいて、指定されたループを優先して並列化します。

多重ループにおいて、並列化した場合に最も効率のよいループを指定することができます。たとえば、最外側ループの繰り返し回数が1や2である場合、最外側ループで並列化しても、その効果は期待できません。このような場合は、次の例のように、SELECT(CONCUR)を指定することによって、より効率よく並列化することが可能となります。

<pre> do k = 1, nz !CDIR SELECT(CONCUR) do j = 1, ny do i = 1, nx c(i) = b(i, j, k) / dbble(nx) a(i, j, k) = a(i, j, k) + c(i) / 2.0 enddo enddo enddo </pre>		<pre> do k = 1, nz do j = 1, ny do i = 1, nx c(i) = b(i, j, k) / dbble(nx) a(i, j, k) = a(i, j, k) + c(i) / 2.0 enddo enddo enddo </pre> <p style="text-align: right;"><u>並列化</u></p>
---	---	---

◆ CNCALL

手続き呼び出しを含むループを並列化してもよいこと指定します。

あらかじめ、ループ中で呼び出しているサブルーチンが並列実行されても問題がないことがわかっている場合、CNCALL を指定することによって並列化が可能となります。自動並列化機能では、引数として渡す変数が、ループ中で明示的に定義されていない(ループ中で値が代入されない)場合は、タスク間共有データ(タスク間での共通の領域を参照するデータ)となるため、渡されたデータがサブルーチン中で更新されないということが、並列実行しても結果不正にならない重要な条件となります。

!CDIR CNCALL

```

do i = 1, n
  call sub(a(i), x)
enddo

```

並列化

たとえば、この例の場合、x はタスク間共有データであるため、複数のタスクでサブルーチン sub が実行され、それぞれで x が更新されると、結果不正を引き起こすことになります。したがって、x が sub 中で変更されない場合のみ、CNCALL 指示行を指定して並列化することが可能です。

◆ 強制並列化指示行

上記指示行等を指定してもコンパイラにそのループが並列化可能であることが認識できず並列化が行われない場合でも、利用者には、そのループが並列化可能であることがわかっている場合があります。このような場合にコンパイラに強制的に並列化を行わせることを指定する指示行が、強制並列化指示行です。

ただし、この指示行を指定した場合、コンパイラはデータの依存関係などのチェックは行わずに並列化をするので、並列化したときの動作の妥当性については利用者が保証しなければなりません。

!CDIR PARALLEL DO PRIVATE(wk)

```
do j = 1, 10
  do i = 1, 100
    wk(i) = a(i) + b(i)
  enddo
  call sub(x(j), wk)
enddo
```

並列化

PARALLEL DO 指示行は直後のループを並列実行することを指定します。各ループの繰り返して作業用に使っている配列(wk)のようにタスク固有のデータは、PRIVATE オプションで指定します。ただし、do 変数はコンパイラが自動的にタスク固有データと解釈するので、明示的に PRIVATE で指定する必要はありません。PRIVATE に指定されなかったデータはタスク間共有データとなります。

!CDIR PARALLEL DO

```
do i = 1, 100
  call sub(a(i), b(i), x)
```

!CDIR ATOMIC

```
s = s + a(i) * b(i)
enddo
```

並列化

ATOMIC 指示行は、PARALLEL DO 指示行で並列化されたループ中の総和や内積など、複数のタスクが同時に実行してはならない代入文に指定します。

(2) プログラミング上の工夫による並列化促進

◆ ループの入れ換えによる並列化促進

次のループは外側ループで並列化すると、 $a(i,j)$ と $a(i,j-1)$ の間に依存関係があり、正しい実行結果が得られません。この場合は、ループを入れ換えることによって並列化が可能となります。

<pre> do j = 2, m do i = 1, n a(i, j) = a(i, j-1) * b(i, j) enddo enddo </pre>	→	<div style="text-align: right; margin-bottom: 5px;"><u>並列化可能</u></div> <pre> do i = 1, n do j = 2, m a(i, j) = a(i, j-1) * b(i, j) enddo enddo </pre> <div style="text-align: right; margin-top: -20px;"> \sum ループ入れ換え </div>
--	---	--

◆ 仮引数の配列サイズ変更による並列化促進

引数として渡ってきたデータは、タスク間で共有となるため、次の例では、配列 c がタスク間共有変数となります。このため、最外側ループ (do k=1,nz) で並列化を行うと、配列 c の領域を各タスクで書き換えることになり、結果不正となってしまいます。

そこで、配列 c の次元の宣言を変更し、最外側ループで異なる領域を使用することにすれば、並列化が可能となります。もちろん、この sub を呼び出しているサブルーチン中の対応する配列に対しても修正が必要です。

<pre> subroutine sub(a, b, c, nx, ny, nz) real*8 a(100, 100, 100), b(0:100, 100, 100) real*8 c(0:100) do k = 1, nz do j = 1, ny do i = 1, nx c(i) = b(i, j, k) / dble(nx) enddo do i = 1, nx a(i, j, k) = a(i, j, k) + (c(i-1)+c(i)) / 2.0 enddo enddo enddo enddo end </pre>	→	<pre> subroutine sub(a, b, c, nx, ny, nz) real*8 a(100, 100, 100), b(0:100, 100, 100) real*8 c(0:100, 100) do k = 1, nz do j = 1, ny do i = 1, nx c(i, k) = b(i, j, k) / dble(nx) enddo do i = 1, nx a(i, j, k) = a(i, j, k) + (c(i-1, k)+c(i, k)) / 2.0 enddo enddo enddo enddo end </pre>
---	---	---

◆ 作業領域の受け渡しをしないことによる並列化促進

上の例において、サブルーチン sub を呼び出している側が、配列 c を参照していない、すなわち配列 c を単なる作業領域として確保している場合、配列 c を引数として渡さずに、サブルーチン sub 側で配列宣言することによって、並列化が可能となります。

```
subroutine sub(a, b, nx, ny, nz)
real*8 a(100, 100, 100), b(0:100, 100, 100)
real*8 c(0:100)
do k = 1, nz
  do j = 1, ny
    do i = 1, nx
      c(i) = b(i, j, k) / dble(nx)
    enddo
    do i = 1, nx
      a(i, j, k) = a(i, j, k) + (c(i-1)+c(i))/2.0
    enddo
  enddo
enddo
end
```

← 引数 c の削除

5. 並列プログラムの性能解析ツール

並列プログラムの実行性能を調べる機能として、プログラム特性情報(proginf 情報)が利用できます。

proginf 情報は、プログラムの実行時に環境変数 F_PROGINF を YES あるいは DETAIL と設定することによって採取できます(東北大学では既定値として DETAIL が設定されています)。以下に、並列プログラム実行時の proginf 情報の出力例を示します。なお、図中の ※ は、並列処理使用時に表示される情報です。

***** Program Information *****		
Real Time (sec)	: 28.779867	経過時間 (秒)
User Time (sec)	: 115.000177	ユーザ時間 (秒)
Sys Time (sec)	: 0.039784	システム時間 (秒)
Vector Time (sec)	: 112.660629	ベクトル命令実行時間 (秒)
Inst. Count	: 47717311106	全命令実行数
V. Inst. Count	: 24518067652	ベクトル命令実行数
V. Element Count	: 6144579540224	ベクトル命令実行要素数
FLOP Count	: 3521968996499	浮動小数点データ実行要素数
MOPS	: 53632.776441	MOPS 値
MFLOPS	: 30625.770224	MFLOPS 値
MOPS (concurrent)	: 214494.483217	MOPS 値 (実行時間換算) ※
MFLOPS (concurrent)	: 122482.168428	MFLOPS 値 (実行時間換算) ※
VLEN	: 250.614348	平均ベクトル長
V. Op. Ratio (%)	: 99.623864	ベクトル演算率 (%)
Memory Size (MB)	: 1600.000000	メモリ使用量 (MB)
Max Concurrent Proc.	: 4	最大同時実行可能プロセッサ数 ※
Conc. Time(>= 1) (sec)	: 28.754953	1 台以上で実行した時間 (秒) ※
Conc. Time(>= 2) (sec)	: 28.753148	2 台以上で実行した時間 (秒) ※
Conc. Time(>= 3) (sec)	: 28.751822	3 台以上で実行した時間 (秒) ※
Conc. Time(>= 4) (sec)	: 28.742525	4 台以上で実行した時間 (秒) ※
Event Busy Count	: 0	イベントビジー回数 ※
Event Wait (sec)	: 0.000000	イベント待ち時間 (秒) ※
Lock Busy Count	: 0	ロックビジー回数 ※
Lock Wait (sec)	: 0.000000	ロック待ち時間 (秒) ※
Barrier Busy Count	: 0	バリアビジー回数 ※
Barrier Wait (sec)	: 0.000000	バリア待ち時間 (秒) ※
MIPS	: 414.932501	MIPS 値
MIPS (concurrent)	: 1659.446674	MIPS 値 (実行時間換算) ※
I-Cache (sec)	: 0.005766	命令キャッシュミス (秒)
O-Cache (sec)	: 0.190763	オペランドキャッシュミス (秒)
Bank (sec)	: 11.404943	バンクコンフリクト時間 (秒)
Start Time (date)	: 2008/06/30 18:07:03	
End Time (date)	: 2008/06/30 18:07:10	

図 4 並列処理使用時の proginf 情報

並列処理の性能を分析するときに重要な情報は、proginf 情報の Conc. Time です。図 4 の例では、このプログラムが 4 つの CPU で約 29 秒ずつ実行されたことが分かります。

この例では、Conc. Time がほぼ均等となっているので、うまく並列化されていると言えます。これが、以下の例

Conc. Time (>= 1) (sec) :	74.154168
Conc. Time (>= 2) (sec) :	8.549322
Conc. Time (>= 3) (sec) :	8.292376
Conc. Time (>= 4) (sec) :	8.071275

のように, Conc.Time(>=1)だけ実行時間が大きく残りが小さい場合は, プログラムが十分並列化できていないと言えます. このようなプログラムは, 4. 2 で紹介した方法などを用いて, より多くのループが並列化されるようにする必要があります.

6. あとがき

以上, FORTRAN90/SX で利用可能な自動並列化機能について, 簡単に説明いたしました.

並列化は, ベクトル化と異なり, すべてを自動まかせにしても, 必ず性能が向上するというわけにはいきません. したがって, SX の並列処理方式を理解した上で, よりよい並列処理が行われるようにプログラムのチューニングを行うことが, 性能向上には大変重要です.

本稿が, 自動並列化利用の手助けになれば幸いです.

参考文献

[1]FORTRAN90/SX プログラミングの手引き 日本電気株式会社 G1AF07

[2]FORTRAN90/SX 並列処理機能利用の手引き 日本電気株式会社 G1AF08

※なお, これらは gen.isc.tohoku.ac.jp 上のコマンド「mansxf90」を実行することによりテキストベースブラウザ(w3m)で参照可能となっています.